

徐亚钦, 翟国庆, 黄旋旋, 等. 2011. 基于雷达和自动站资料研究风暴演变规律 [J]. 大气科学, 35 (1): 134 - 146. Xu Yaqin, Zhai Guoqing, Huang Xuanxuan, et al. 2011. A study of the evolution regularity of storm based on the data of radar and automatic station [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 134 - 146.

## 基于雷达和自动站资料研究风暴演变规律

徐亚钦<sup>1, 2</sup> 翟国庆<sup>1, 2</sup> 黄旋旋<sup>3</sup> 朱佩君<sup>1</sup> 何斌<sup>4</sup> 沈杭锋<sup>1</sup>

1 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 浙江省宁波市气象局, 宁波 315012

4 浙江省嘉兴市气象局, 嘉兴 314000

**摘要** 为了研究地面中尺度辐合对对流回波发展趋势的影响, 本文利用多普勒雷达和经过质量控制的地面加密自动站资料, 选取浙江宁波地区较典型的 10 次强对流天气过程, 逐时统计地面辐合场、累计雨量、雷达回波之间的相互对应情况, 并进一步通过 Shuman-Shapiro 滤波来揭示地面中尺度风场辐合与风暴发展的内在联系, 最后基于所统计的回波发展和地面辐合的关系利用交叉相关法对风暴进行外推预报。结果表明: 雷达回波前沿的地面中尺度辐合区域对未来回波的发生、发展有着重要的作用, 特别是存在地面中尺度辐合线的区域更有利于对流单体的新生和发展, 同时对主回波未来的走向和形状也有较大的影响。通过 Shuman-Shapiro 滤波进行尺度分离后可以发现, 在风暴发展前沿和一些风暴团之间存在着明显的风场辐合作用, 它对未来风暴的发生发展起了重要的传递和媒介作用。最后, 基于地面辐合场用交叉相关法对风暴进行外推预报, 得到的外推回波场和实况回波场在形状、中心强度上都有较好的对应关系。

**关键词** 强对流天气 地面辐合 匹配统计 Shuman-Shapiro 滤波 风暴外推

**文章编号** 1006 - 9895 (2011) 01 - 0134 - 13

**中图分类号** P445

**文献标识码** A

## A Study of the Evolution Regularity of Storm Based on the Data of Radar and Automatic Station

XU Yaqin<sup>1, 2</sup>, ZHAI Guoqing<sup>1, 2</sup>, HUANG Xuanxuan<sup>3</sup>, ZHU Peijun<sup>1</sup>,  
HE Bin<sup>4</sup>, and SHENG Hangfeng<sup>1</sup>

1 Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2 State Key Lab of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Ningbo Meteorology Bureau, Ningbo 315012

4 Jiaxing Meteorology Bureau, Jiaxing 314000

**Abstract** In order to study the effect of surface mesoscale convergence on the development of convective echoes, the authors analyze statistically the relationship of convergence field, rainfall, and radar echoes in the selected ten convective weather processes in Ningbo region by use of radar and surface automatic station data after quality control. And the role of surface mesoscale wind convergence in the storm development is revealed by use of the Shuman-Shapiro

**收稿日期** 2010 - 02 - 08, 2010 - 07 - 16 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40975021, 国家天气灾害实验室重点项目 2008LASW-A03, 国家海洋环境预报中心的近海海区雷达资料同化技术研究项目 H2081938

**作者简介** 徐亚钦, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达遥感和中尺度暴雨分析。E-mail: hekele@zju.edu.cn

piro filter. At last, the storm is extrapolated with the cross-correlation method based on the statistics of relationship between the development of echoes and the surface convergence. The results indicate that: The surface mesoscale convergence in front of the radar echoes plays an important role in the echo occurrence and development, particularly the area where there exists surface mesoscale convergence line is more propitious to monomer newborn and development, at the same time it also has a great influence on the future direction and shape of the major echo. After scale separating by use of the Shuman-Shapiro filter it can be found in the front of and between the storms, the wind field interacts obviously with each other, as the transmission and media it plays an important role in the storm development. Finally, after extrapolating the storm based on the ground convergence field with the cross-correlation method, the shape and center of the echo have a very good correspondence between the extrapolation echoes filed and the fact echoes filed.

**Key words** convective weather, surface convergence, matching statistic, Shuman-Shapiro filter, storm extrapolation

## 1 引言

多普勒天气雷达资料和加密的地面自动站资料是目前中尺度天气分析和短时临近预报中选取的最实用、便捷的资料。它可以解决常规气象资料时间间隔长、空间分辨率稀疏、分析中小尺度系统存在局限性等不足,能够较好地反映中小尺度信息和灾害性天气演变过程。通过提取并分析雷达和自动站资料,对短时临近预报和局地突发性天气预警有很重要的指示作用。由于获取的多普勒天气雷达扫描最低仰角为 $0.5^\circ$ ,因此它还不能反映出地面要素信息,而地面自动站资料可以充分反映出地面层附近的要素信息。因此,结合自动站资料和雷达资料可以对强对流天气系统从低层到中层进行综合分析。许多学者(翟国庆等,1991; Qiu and Xu, 1992; 卢焕珍等,2008)运用雷达和自动站资料来分析各种中尺度天气系统,由于雷达资料可以直接表现出相应的天气特征,因此可以根据雷达资料或各种雷达产品来分析天气演变过程,而自动站资料所包含的实况要素场也可以充分反映出相应的天气形势。加密自动站资料和雷达资料也可以为短时、短期数值模式预报提供加密的中尺度同化数据,可较好地提高预报准确率,因此,有些学者(邵明轩等,2006; 丁伟钰等,2006)将雷达和自动站资料通过一定的转换同化到不同的模式中,由于雷达和自动站资料有着较为密集的空间分辨率,同化后可以使得模拟结果更加逼真,一些有益的中小尺度信息也可能反映出来。还有些学者(陶祖钰,1992; 刘黎平等,2006,2007; 房彬等,2010)通过对雷达资料进行一定的风场或雨量反演,并结合自动站实况资料进

行研究分析。一些研究结果也表明了对流发展与地面辐合之间有着较好的对应关系,但利用加密地面自动站资料细致分析的研究仍不多。本文试图通过时间更密的自动站风场资料来研究地面辐合对回波发展趋势的影响,并进一步通过中尺度滤波来寻找风场辐合和回波发展之间的内在联系,最后基于风场辐合和回波发展的对应关系,用交叉相关法对雷暴云进行外推预报。

## 2 基本资料及处理

### 2.1 选取的基本资料

本文使用的资料主要为多普勒雷达资料和加密的地面自动气象观测资料。其中,雷达资料源自宁波的我国新一代S波段多普勒天气雷达(CINRAD/SA)扫描的强度场(反射率因子)资料,其时间间隔约为6 min一次,空间分辨率为 $1^\circ \times 1$  km。选用的加密地面自动气象观测站资料是浙江省地区的加密自动站资料,所选取范围的站点分布如图1所示,它包含有瞬时风、2分钟平均风、10分钟平均风、极大风速、最大风速、累计雨量等要素变量,其时间间隔为10 min一次。

### 2.2 基本资料前处理

当读取多普勒雷达反射率因子资料后,通过Cressman插值法(Cressman, 1959)将极坐标格式的数据插值到 $1$  km $\times$  $1$  km的笛卡尔坐标系中。对于中尺度自动气象站资料,在原始自动站数据中可能会存在一些随机性或系统性误差,因此需要对原始自动站要素进行一定的质量控制,以免某些误差过大的站点影响了实况要素场。由于只需对自动站的风场资料进行质量控制,故采用简单逻辑性检

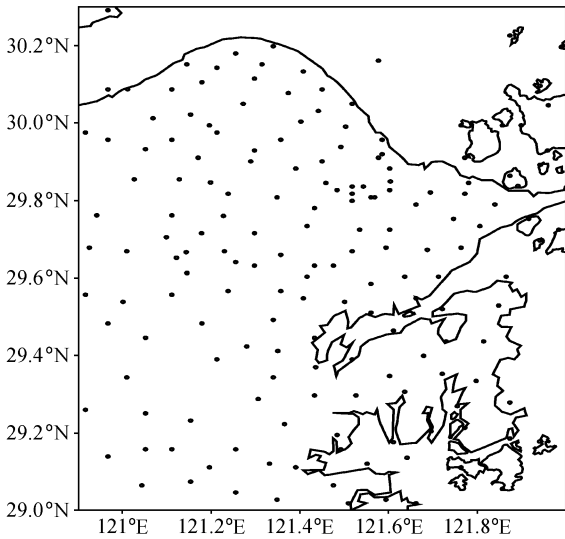


图 1 宁波地区地面自动气象观测站分布图

Fig. 1 Distribution map of ground automatic meteorological observation stations in Ningbo

查、时间连续性和空间一致性检查来对自动站风场资料进行质量控制。

(1) 逻辑性检查。对于采集到的原始自动站数据进行逻辑性判断,即排除明显无气象意义的错误资料。它主要包括采集时间检误和资料检误。

(2) 时间连续性检查。所谓的时间连续性检查,即利用一定时间范围内风场要素与时间具有良好的一致性来识别出不太理想的要素突变站点。当要素资料超出一定时间内的变化范围,则该数据视为可疑点。由于本文研究的是强对流天气过程,当遭遇强系统过境时,单站风场要素会发生剧烈的变化,为了避免剔除该类型站点数据,选择时间范围在 1 小时内的连续 6 个时次,如果在某个时次检验出某个可疑站点后,再对该可疑站点要素与周围最近距离的若干个站点要素的平均值(风向、风速)进行比较。如果该站点与周围站点要素的平均值也超过了相应阈值,则剔除该站点。

(3) 空间连续性检查。由于一些误差不能被时间连续性检验排除掉,因此,在时间连续性检查后还需要对自动站数据进行空间连续性检查。所谓的空间连续性检查,即利用临近自动站点空间相关性原理来检查某一站点与周围站点是否存在过大的差异。这里对每个站点计算与它一定距离内的若干站点的风场梯度。如果得到的所有梯度的平均值超过相应的阈值则该站点为可疑站点。由于在研究区域

中存在几个相对比较孤立的站点,为了尽可能保留该站点,因此在进行空间连续性检查时如果某一站点与它周围最近站点的距离大于 11 km,那么保留该站点,不进行空间连续性检查。同时,由于研究区域的地形较为复杂,在图 1 中不仅存在宁波地区的四明山和台州地区的天台山等山地区域,同时也包含较为复杂的海岸线区域。因此在一些山区附近和海岸线附近的测站观测到的要素值可能会和周围测站的要素值有较大差异,因此需要进行检测。对于筛选出来的可疑站点,计算它周围临近若干个站点的平均测站高度,如果该可疑站点与周围站点平均高度相差在设置阈值内,说明该站点与空间内其它站点高度差异不大,而风场要素则差异较大,因此剔除该站点。

通过以上步骤对自动站资料进行质量控制之后,通过 Cressman 插值将经纬度上的自动站资料插值到格局为  $8\text{ km} \times 8\text{ km}$  的网格点上。为了充分考虑风场要素沿着气流方向的自动相关性,采用各项异性的权重函数——椭圆型权重,使不同方向上的影响半径不一致,在风场的法线方向影响半径最短,而沿着气流方向的影响半径最大,经过逐步迭代后就得到了经过质量控制后的格点场上的风场资料,之后再运用中央插分法计算出格点场上的地面层散度。

### 3 雷达回波发展与辐合关系

在获取的实况气象资料中,风暴综合特征和短时运动状态可以用雷达反射率场来表现,而风暴未来的发展趋势可以从地面自动气象观测资料中去挖掘。为了探求风暴发展和中尺度地面风场之间的关系,利用宁波多普勒雷达、自动站资料,对近年来严重影响宁波地区的 6 月到 8 月之间的 10 次强对流灾害天气过程进行逐时次统计分析,寻求雷达回波、地面中尺度辐合、累计雨量之间的相互关系,并通过 Shuman-Shapiro 滤波处理来进一步寻找回波发展和中小尺度风场辐合的内在联系。

#### 3.1 回波发展和中尺度辐合的统计关系

对选取的个例进行研究发现,在风暴发展的前沿一般都存在着明显的风场辐合,强辐合中心一般对应着未来强回波中心,且辐合区域随着雷达回波移动而移动。图 2 选取了其中一个个例的两个时次 19:00、19:50 (北京时,下同) 作为代表,它可以大

致反映出雷达回波和回波前沿辐合场及未来累计雨量之间的对应关系。从图 2 中可以看到, 雷达回波带的前缘及辐合区域和未来半小时的降水区(蓝线)存在着较好的对应关系, 强回波中心和未来暴雨区也比较吻合。在雷达回波前缘尤其是强回波区的前缘, 同样对应着地面辐合区(绿线), 地面的环境流场特征基本是雷达回波带的南侧为偏南气流, 回波带区域及回波带后部为东北气流或偏东气流, 由此产生了环境汇合气流所对应的中尺度辐合中心和降水中心。位于雷达回波前缘的地面中尺度辐合则较规律性地与回波一起移动, 且地面辐合中心区

域常与未来的回波强中心区域有对应关系, 即图 2a、b 中回波前沿的约 0.1 个经纬度附近存在较为明显的辐合区域(绿线)而之后该区域成为了强回波中心区域, 回波中心强度和地面辐合强度也有着较好的正比关系(图略)。因此, 通过对地面辐合场的分析, 可以提取多普勒雷达回波未来发展趋势的中尺度预测信息, 并且通过雷达回波和地面辐合场可以判断出未来暴雨范围和雨量中心的可能性。

地面中尺度辐合线对未来回波的新生和发展趋势有重要的影响。一些个例中, 在回波前沿较远处就存在着明显的地面中尺度辐合线。图 3 列举了

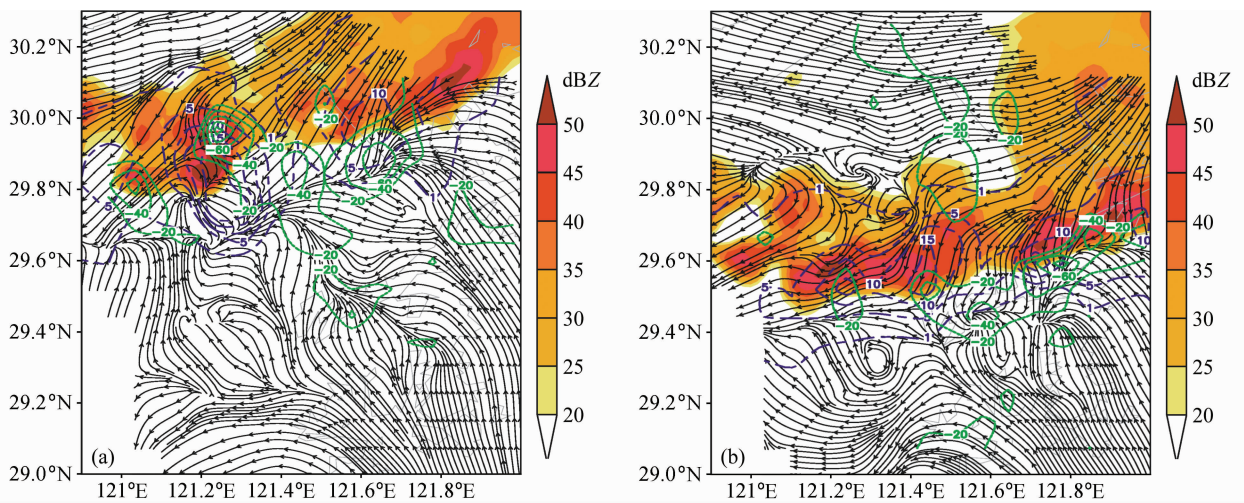


图 2 2009 年 6 月 5 日 (a) 19:00 和 (b) 19:50 雷达回波、流场、辐合场和累计雨量图。流线: 2 分钟平均风; 彩色阴影:  $0.5^\circ$  仰角雷达反射率(单位: dBZ); 绿线: 辐合场(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ); 蓝线: 未来 30 min 累计雨量(单位: mm)

Fig. 2 Radar echoes, streamline, convergence, and accumulated rainfall chart at (a) 1900 BJT and (b) 1950 BJT (Beijing time) on 5 Jun 2009. Streamline: 2-minute mean wind; color:  $0.5^\circ$  elevation radar reflectivity; green line: convergence field (units:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ); blue line: the cumulative rainfall (mm) in the next 30 min

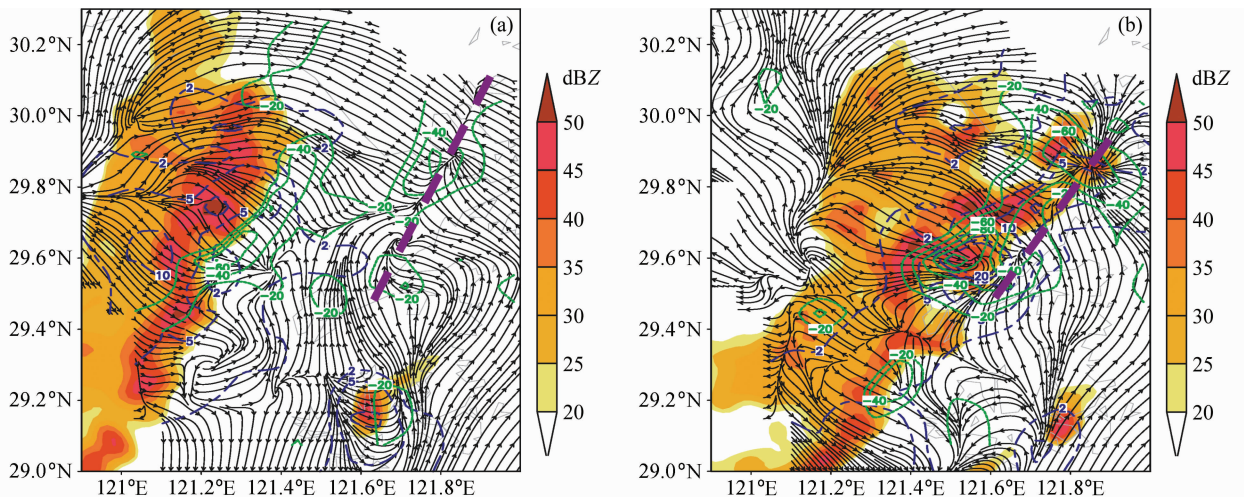


图 3 同图 2, 但为 2006 年 6 月 10 日 (a) 12:00 和 (b) 12:20。红线代表辐合线

Fig. 3 As in Fig. 2, but for (a) 1200 BJT and (b) 1220 BJT 10 Jun 2006. Red line represents convergence line



2006年6月10日的一次强对流过程,在图3a中可以看到在回波带前缘0.6个经度附近,存在着一条明显由偏西风与偏东风组成的辐合线(图3a红线),它伴有一个独立的辐合区(绿线),辐合中心达到了 $-4.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ;20分钟后,原带状对流系统向东移动了0.4个经度左右(图3b),原辐合线(图3a红线)区域则新生了多个雷达回波单体,新生的回波单体与原回波单体相结合使得雷达回波强度中心也跳跃到了辐合线区域(图3b红线)。原雷达回波前沿的辐合区域和辐合线的辐合区域也合并到了一起,导致地面辐合强度有了一定的增强,中心强度达到 $-6.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。同时,也可以看到在这个时间段里,原对流回波带前沿的强回波带由近南北走向,演变为近东北西南走向,在较短的20 min内,强对流回波带发生了一定的顺时针旋转。

图4(见文后彩图)所示的另一个个例也可以看到同样的情况。在雷达主回波移动的前方约50 km(图4a)的地面存在着由偏西气流与西南气流组成的风场汇合线(图4红线),并伴有明显的地面辐合(图4绿线),辐合中心达到了 $-4.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,该区域在50 min后(图4b)便成为雷达回波及雨量的中心区域(图4b蓝线),整个回波的形状由于汇合线的存在也因此发生了较大的变化,在暴雨区附近也存在强的对流回波。同时在下游地区再次出现明显的由偏西与偏南气流组成的汇合线(图4b红线),并同时伴有较强的辐合带(绿线)。地面辐合所在的区域再次构成有利于近地面气流的抬升,并且不同属性气流相互汇合也使得该区域变得不稳定,从而有利于新的风暴单体生成,而风暴单

体往往存在着合并效应,因此有利于风暴单体新生发展的辐合(线)区域可能就是未来回波和雨量的中心区域,并且辐合线的存在不仅影响了风暴的发展趋势,同时在很大程度上也影响了风暴的走向和形状。回波前沿的辐合(线)犹如回波移动发展的传递者和触发者,它既可能是由老雷暴下沉气流到地面后的阵风锋,也可能是汇合了环境气流而进一步向前推进的汇合线。

从加密的地面资料辐合场信息中可以透射出回波未来的发展趋势,但是并非在回波移动的前沿方向就一定存在着相对应的辐合区域,有效的辐合线也不一定存在于每个个例中。为了探求强对流天气过程的雷达回波和回波前沿辐合及未来半小时累计雨量的相关性,我们利用当地多普勒雷达及地面加密场资料对选取的10次强对流过程每隔10分钟进行逐时次分析来统计它们的匹配性。所谓匹配,就是从系统移动到选定区域时如果某一时次回波前沿存在着有效的辐合区域(即辐合中心、范围和未来回波中心、范围相对应),且回波及辐合与未来半小时雨量较为吻合则算当前时次整体相互匹配。判定是否存在相应的辐合线配合则看在连续3个时次内辐合线是否都存在,且与未来回波对应,如果辐合线不与未来回波持续配合则只是说明存在辐合线。在表1中可以看到每个选取过程的回波、雨量、辐合三者的匹配及辐合线的大致对应情况,其中匹配数即在选定范围内的符合时次总数。从表1中可以看到它们的匹配率基本大于65%,进一步统计所有个例中平均三者整体相互匹配百分率( $P_A$ )可以得到 $P_A=73.7\%$ ,由此也进一步证实雷达回

表1 不同个例的雷达回波、累计雨量和辐合的匹配关系

Table 1 Matching relations of radar echoes, accumulated rainfall, and convergence in different cases

个例日期	匹配数	时次总数	匹配率	回波和辐合线的配合情况
2006-05-09	7	9	78%	有辐合线配合
2006-06-10	10	11	90%	有辐合线配合
2007-07-07	5	7	71%	存在辐合线
2007-07-11	8	12	67%	无明显对应辐合线
2007-07-23	10	13	77%	存在辐合线
2007-08-03	7	9	78%	无明显对应辐合线
2008-05-27	7	12	58%	存在辐合线
2008-06-10	10	13	77%	无明显对应辐合线
2009-05-23	15	21	71%	有辐合线配合
2009-06-05	16	17	94%	有辐合线配合

波前沿的辐合区域对浙江东部沿海地区未来回波的发生、发展有着重要作用。并且在存在辐合线但不是很匹配的情况下匹配百分率为 77.0%，而有辐合线配合这一条件下的匹配率为 83.3%。因此如果系统中存在着相应的辐合线，那么辐合和回波的匹配性将更高，辐合的效果可以更大程度地反应出回波的发展趋势。

但是，在一些个例中，通过自动站资料直接反映出的流场中并不能很好地找到有效与未来回波相对应的辐合线，并且在有些个例中辐合线也完全没有从初始流场中表现出来。因此，如果能从加密的自动站流场中提取相应中小尺度系统间的风场作用，便有利于在更小的空间尺度和时间尺度上更加准确地判定风暴的短时发展趋势。

### 3.2 用滤波提取辐合内在信息

大尺度系统提供了支持中尺度天气系统形成的条件和环境场，中尺度系统才是直接造成暴雨的天气系统（陶诗言，1980），特别是对于多单体风暴团之间的气流交换是在中小尺度范围内进行的。并且中尺度扰动同环境场之间往往存在着相互作用（高守亭和周玉淑，2001），提取有效的中尺度扰动场以及它们的相互作用场，可以分析出影响风暴发展的内在因子（翟国庆和俞樟孝，1991，1992）。基于前面的统计分析我们知道回波前沿的辐合有利于回波的新生和发展，特别是存在着有效辐合线的情况下匹配率为 83.3%，可以更加准确地判断出回波的发展趋势。为了有效判断辐合线的位置，本文运用中尺度滤波方法来进行尺度分离，希望通过滤去大尺度背景流场来提取  $\beta$  中尺度以下的系统，寻找出系统发展时中小尺度系统的气流相互作用情况。常用的 Barnes 带通滤波法（Barnes，1972）对于  $\alpha$  中尺度的提取效果较好，之前许多学者（蔡则怡和于波，1988；陈忠明，1992）通过 Barnes 带通滤波处理分析都是分离  $\alpha$  中尺度以上的系统，而 Shuman-Shapiro 平滑滤波法（章国材等，2007；覃丹宇，2010）由于提取波段是基于客观分析到格点的格距为基准，这里为了提取雷达回波团之间的气流需要分离出  $\beta$  中尺度到  $\gamma$  中尺度的中小尺度信息场。因此，这里使用 Shuman-Shapiro 滤波技术来进行处理，其基本思路是：先通过插值处理将选定区域的经纬度资料插值到格点场，再选取适当的滤波系数  $S$ 。对于二维要素场而言，9 点平滑的滤波

算子为：

$$\begin{aligned} \bar{f}_{i,j} = & f_{i,j} + \frac{S(1-S)}{2} (f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + \\ & f_{i,j-1} - 4f_{i,j}) + \frac{S^2}{4} (f_{i+1,j+1} + f_{i-1,j+1} + \\ & f_{i-1,j-1} - 4f_{i,j}), \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $S$  为滤波系数； $f_{i,j}$  为相应格点要素值； $\bar{f}_{i,j}$  为滤波后平滑场。那么，它的响应函数为

$$R(S, n) = \left(1 - 2S \sin^2 \frac{\pi}{n}\right)^2,$$

令

$$R(S, n) = 0,$$

可以得到  $S$  与  $n$  的关系为

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{n}}.$$

选取适当的  $n$  得到不同的滤波系数可以滤除不同  $n$  倍数的格距波，再用原物理场减去滤波后的平滑场，就可以分离出  $n$  倍格距波长的扰动波，可以选取多次不同的滤波系数来构造所需要的中尺度滤波器。在经过多次滤波后，原始波有着一定程度的衰减，需要乘以一定的比例系数  $r$  使最大响应波长对应的响应函数值趋于 1，来增加滤波后波的振幅。

图 5 给出了某一个个例的两个时次 21:10、21:20 作为代表，其中图 5a、c 代表没有采用滤波方案，图 5b、d 表示采用了滤波方案，相同方案两图间隔 10 min。从图中可以看到，滤波前的强雷达回波（风暴）前沿以偏南和偏东南气流为主，并没有出现明显的辐合线系统（图 5a、c），当通过 Shuman-Shapiro 滤波处理后（图 5b、d），在强雷达回波的前沿地区，可以明显地看到在风暴前方约 0.1 个经纬度位置，存在着相对应的辐合线（L2），并且图 5b 时刻辐合线 L2 的位置和图 5d 时刻的风暴位置较为一致，即图 5b 强风暴在 10 min 后移到了 L2 辐合线的位置，移动了 0.1 个经度，换句话说，L2 辐合线的存在有助于该区域雷暴的新生和发展，使风暴在该区域得以继续发展或跳跃性传播。从雷暴的传播角度来说，实质上是雷暴的地面流出气流快速向前冲击前方环境气流的现象，即阵风锋现象，它有时候表现较明显，有时候则通过采用滤波的方法才表现出来。这种雷暴下沉出流，也可以在风暴团之间存在，例如图 5 中辐合线 L1，那么风暴团之间存在的辐合线是否像前面统计的风暴前沿的辐合

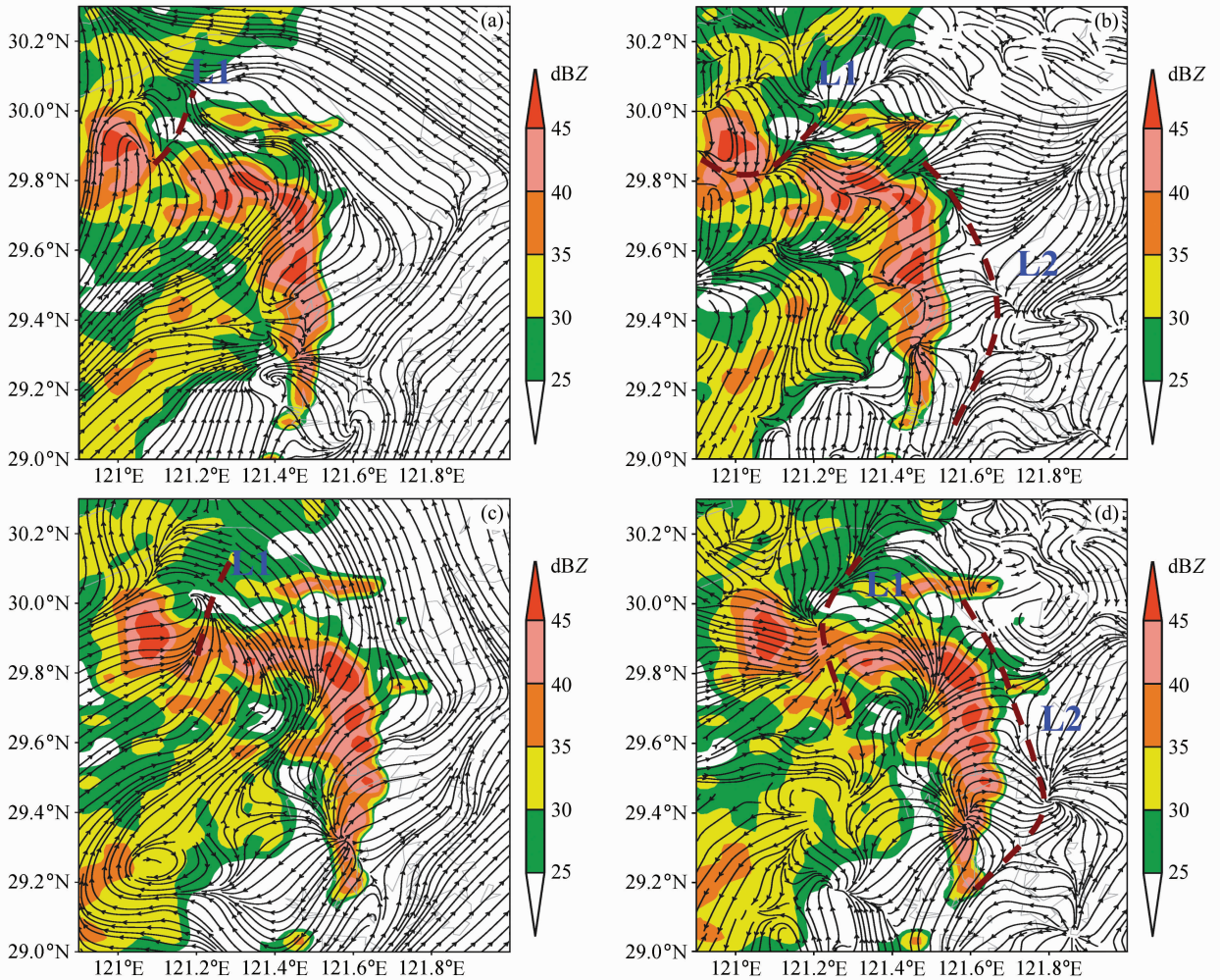


图5 2006年5月9日(a、b) 21:10和(c、d) 21:20雷达回波和流场图:(a、c)原始流场;(b、d)进行滤波处理后的流场。彩色阴影:0.5°仰角的雷达反射率(单位:dBZ);L1、L2:辐合线

Fig. 5 Radar echoes and the streamline field at (a, b) 2110 BJT and (c, d) 2120 BJT 9 May 2006; (a, c) The original streamline field; (b, d) the filtered streamline field. Color: 0.5° elevation radar reflectivity; L1, L2: convergence lines

线一样有利于新回波团的生成?

通过对个例进行滤波分析发现,在有些个例中,可以比较明显地看到有些回波团之间存在明显的地面中尺度辐合线,在雷达回波团间的中尺度辐合线区域未来也生成了新的回波单体。使得整个回波带连成一片。图6选取了其中一个个例来表征这一现象。在图6的雷达回波中,我们将主要回波团的位置以“C<sub>1</sub>”、“C<sub>2</sub>”标出,分别代表两个对流云团,在它们之间的实况风场大致为东北风(图6a),当经过Shuman-Shapiro滤波处理后(图6b),可以清楚地看到回波团C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>之间的风场存在明显的中尺度风场变化,在两对流云团之间出现了风向的辐合(图6棕线),随着风场辐合作用的存在(在该

例中持续30 min左右),30 min后(图6c、d),原C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>之间的辐合线上产生了新的回波单体C<sub>3</sub>,同时也使C<sub>2</sub>云团得到发展,使得整个近东西向的回波带略呈弓形。从滤波后风场汇合情况看,C<sub>3</sub>的生成可能由于雷暴团间的下沉气流汇合在底层辐合上升所激发生成的,低层的辐合可以改变大气层结,也有利于水汽再度分配向上输送,有利于新的单体的生成和发展。因此回波团之间的气流辐合上升后容易激发出新的回波。这一点也可以用Simpson et al. (1980)的关于合并机理的假设来解释,对于两个单体之间经常观测到新生的回波,Simpson et al. (1980)利用雷达观测结果提出两个积云塔之间,下沉气流诱发的阵风接近和相遇时会激发



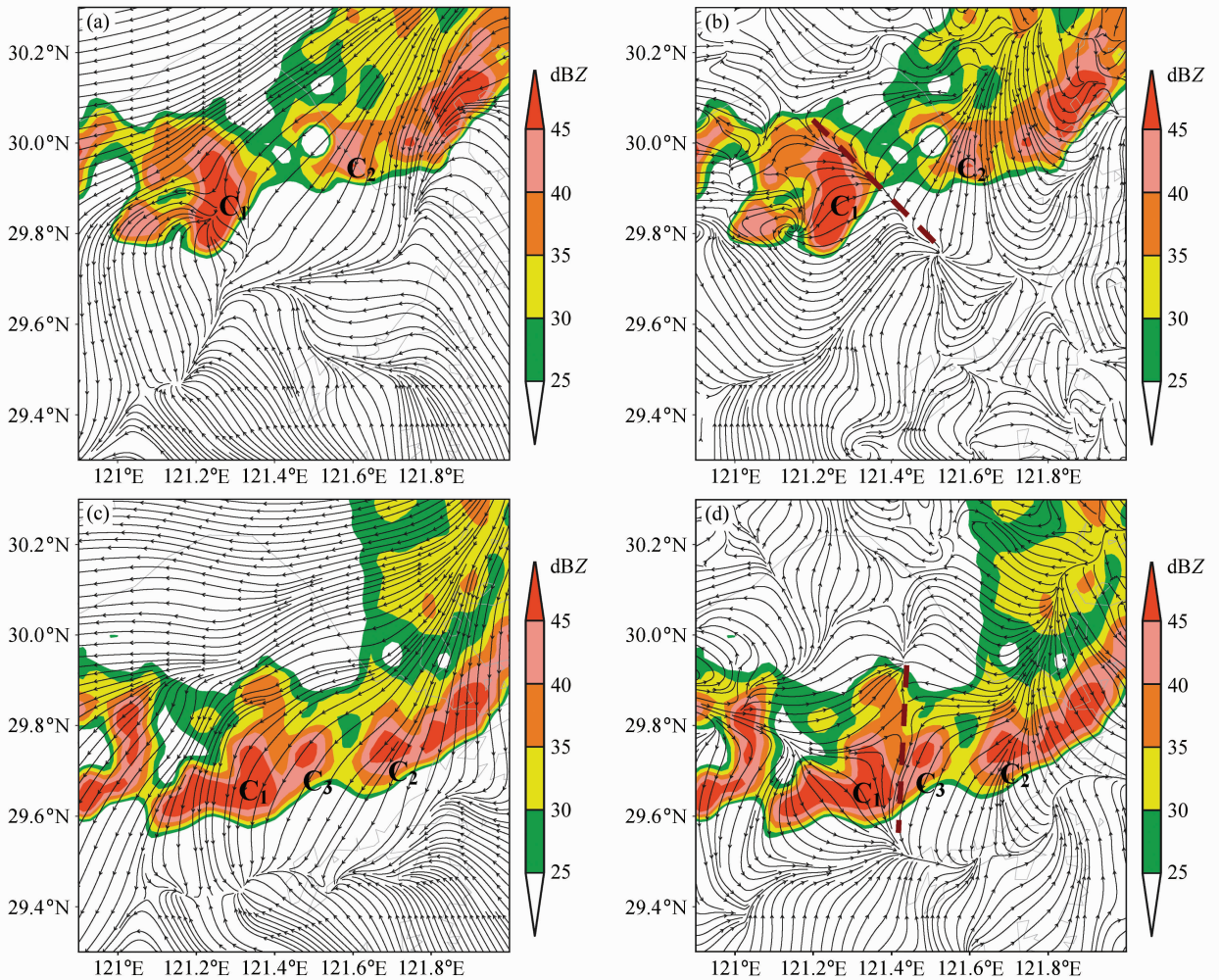


图6 同图5, 但为2009年6月5日(a、b) 19:10和(c、d) 19:40。C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>代表不同的风暴单体(下同); 棕线表示辐合线  
 Fig. 6 As in Fig. 5, but for (a, b) 1910 BJT and (c, d) 1940 BJT on 5 Jun 2009. C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> represent the different storm monomers (similarly hereinafter); Brown lines indicate the convergence lines

新的积云顶, 新生的积云顶会从跨接的云区迅速向上发展。

上面进行滤波后的风场和0.5°仰角的PPI雷达反射率图表征了近地层的风场辐合信息和回波发展信息。为了进一步探求中高层和垂直剖面上的雷达反射率是否反应出了两个回波团之间的相互作用, 可分别选取雷暴单体C<sub>3</sub>新生、发展和成熟三个阶段相应的3 km高度雷达反射率图来表征[图7(见文后彩图)]。在图7a中, C<sub>1</sub>单体回波反射率较强, 发展十分旺盛, 而C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>单体整体回波强度相对较弱。6 min之后(图7b), 雷暴单体C<sub>3</sub>逐渐增强, 范围开始扩大。再经过6 min(图7c), 雷暴C<sub>3</sub>和C<sub>2</sub>单体得到了不同程度的进一步发展, 使得回波整体更好地连成一条线。从3 km高度

CAPPI (constant altitude plan position indication) 场中, 我们可以比较明显地看到云团之间相互作用发展起来的新生对流单体的强度增长过程。

为了进一步分析垂直层上的风暴发展情况, 取相应切于雷暴单体C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>的垂直剖面(图7a-c“AB”线)。在剖面图7d时刻, 可以看到C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>发展高度较高, 达到10 km左右, 其中C<sub>1</sub>的回波强度还较强, 但是C<sub>3</sub>明显较弱, 回波的高度也较低; 6 min后, 从图7e中可以看出C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>回波单体发展的高度基本相同, 但仍然处于3个独立的回波其中C<sub>1</sub>的回波强度最强。同时, 图7d、e的回波单体C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>之间的底层存在着明显的类似“桥状”的回波连接带, 这里将它称之为“回波桥”, 在d时刻, 这一“回波桥”整体在2 km高度以下,



平均强度值为 32 dBZ 左右, 而  $C_2$  单体的高度在 5 km 左右。随着单体  $C_2$  的逐渐发展, “回波桥”上升到了 4 km 高度左右, 平均强度值为 38 dBZ 左右, 此时  $C_2$  单体的回波顶高度也上升到了 8 km 左右, 整个垂直回波范围和中心强度都有了一定的扩大和加强。这一“回波桥”也间接反映出了风暴单体  $C_1$  和  $C_2$  之间存在着明显的相互交换, 对新生  $C_3$  单体的发展有着很重要的作用。随着  $C_3$  单体的发展成熟(图 7f), 风暴单体  $C_2$  和  $C_3$  之间的“回波桥”也开始逐渐断裂, 并且  $C_1$ 、 $C_2$  单体的内部强回波区域也有了一定的倾斜。从剖面情况来看, 在  $C_3$  的生成发展过程中, 低层一直存在着较为明显的“回波桥”, 而这“回波桥”很可能起了水汽、能量相互传输的媒介作用, 而从上面滤波后的风场中(图 6)可以得知, 低层风场上的相互交换所产生的辐合(线)正是这一作用的重要触发机制和运输媒介。

## 4 基于风场辐合的风暴外推

风暴的运动由平流和传播共同合成(俞小鼎等, 2006)。由于风暴是由流动的气流组成, 因此风暴具有平流运动的特征且风暴大致是随着风暴承载层的平均气流方向而平流的, 同时, 在风暴某侧由于单体的新生引发了风暴的运动, 新生单体常常是新上升气流发展的发展, 通常上升气流位置很大程度上取决于边界层辐合的位置。因此, 我们可以根据风暴平流性质对其进行外推预报, 同时根据风暴的传播性对其进行趋势预报。从上文对风暴发展和地面风场辐合相互关系的研究中我们知道风暴发展与地面辐合有着较为密切的关系。地面有效的风场辐合(线)可以在一定程度上判定回波未来的发展趋势, 辐合的强度和范围可以影响未来回波的强度和范围, 但总体还是较为定性。那么, 我们能否利用地面辐合这一信息作为基础来对未来回波进行外推指导, 以便能更准确地定位未来可能的强回波中心和强度。

### 4.1 风暴外推介绍

目前, 对雷暴进行追踪、短时临近预报应用最广泛的基础方法是: 质心跟踪法(Dixon and Wiener 1993; Johnson et al, 1998; 陆汉城和杨国祥, 2004)和交叉相关法(陈明轩等, 2007)。质心跟踪法是先将雷暴回波视为单体加以识别, 从而获得雷

暴单体的诸多特征, 如雷暴中心、反射率权重质心、雷暴体积、雷暴顶和底等, 对这些特征用线性最小二乘拟合法, 进行雷暴的匹配跟踪。典型的例子有 WSR-88D 和 WDSS 中的风暴单体识别与跟踪以及 TITAN 等。交叉相关外推法主要通过建立不同时次雷达回波的最佳拟合关系, 从而达到追踪一定区域内雷达回波的过去移动特征, 反演得到风暴的矢量风, 然后通过反演出来的矢量风及原来的回波特征来外推确定回波未来的位置和形状。其中, NCAR 的临近预报系统“Auto-Now Cast”(Muel-ler et al., 2003)也采用了 TREC 方法构造雷达回波运动矢量场。

Tuttle and Gall (1999) 通过雷达资料反演热带气旋的 TREC 风矢量, 表明用 TREC 法得到的回波移动速度与穿越热带气旋飞机所测风速的相对误差小于 10%。因此, 通过对相连时刻的反射率场反演风场, 可以较为准确地描绘出风暴的运动特征, 对于风暴的追踪、短时天气预警有较好的实际意义, 因此这里选取交叉相关外推法来进行外推预报。Henry (1993) 研究表明, 对于多单体和超级单体风暴仅有 12% 的生命史小于 30 min, 而 47% 的风暴可维持 1 小时以上, 因此, 根据前面通过交叉相关法反演出的外推风场对多单体风暴进行 30 min 的外推是具有时效性保证的。

### 4.2 基于风场辐合的风暴外推原理

首先, 用交叉相关法对多普勒雷达资料进行风场反演得到基于格点场的风暴运动矢量风, 再对每个反射率大于 20 dBZ 的格点根据其对应的矢量风进行时间为 30 min 的外推得到初始外推回波场。传统的回波外推只考虑了回波本身的属性, 并没有通过地面辐合场对外推回波进行优化订正。为了更加改进外推结果特别是外推后的回波中心强度和范围, 这里根据外推起始时刻的辐合场对外推结果进行一定的订正。基于地面辐合场对外推回波进行订正的流程如图 8 所示, 其具体处理流程为:

(1) 由于雷达回波前的散度在一定程度上存在着较杂、较乱的问题, 而这里在进行订正处理时主要考虑主辐合中心。因此, 在用散度对外推回波进行订正时需要先通过 9 点平滑滤波滤去原始场中的短波噪音, 突出较强系统间的辐合辐散中心, 使得整体的辐合较为稳定。

(2) 对地面辐合场进行空间重新分割。首先把

辐合场分为两类：一类是离回波较远处的系统性辐合（常常处于辐合线的区域），首先判定它的强度是否有一定的持续性，如果它持续存在，那么，它可能与未来的回波中心较为对应；另一类是基于前面统计的回波前沿的移动性辐合，它一般随着回波移动而移动，在辐合的中心区域容易产生新的回波，它是回波传播效应的重要传递者。那么对雷达回波进行 30 min 外推时，这一类地面辐合场在外推起始时刻并不能反映出未来 30 min 的回波中心位置，因此需要对它进行一定的位相移动。这里对整个回波强度大于 20 dBZ 的区域中的反演 TREC 风进行整体平均，得到的平均风作为风暴前沿处辐合场位相移动的参照标准。对分割后的地面辐合场，即经过位相移动后的原回波前沿性辐合场和离回波较远处的延续性地面辐合场进行重新组合插

值。这样可以得到进行空间分割后重新组合而成的辐合场，该辐合场的中心区域可以比较好地代表未来的回波中心区域。

(3) 在得到重新分割处理的地面辐合场后，根据辐合中心和辐散中心对外推后的雷达反射率场进行适当的订正。对于地面辐合场的强度介于  $\pm 1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的区域不加以考虑。在进行地面辐合场订正后，根据过去实况选取适当的参数进行一定的数值大小调整，这样就可以得到适配辐合中心的外推雷达回波场。

### 4.3 外推结果分析

基于地面辐合场对风暴进行外推，不仅仅考虑到了风暴随环境气流的运动情况，也考虑到了中尺度动力辐合、辐散场对风暴的加强和抑制作用。这里以选取一个个例来进行分析说明，从图 9a 中我们可以看到外推雷达回波区域（阴影）和图 9b 中的实况回波区域（阴影）的形状、走向大致都相对应，特别是回波中心强度和位置也很对应，并且外推回波大于 20 dBZ 的区域（图 9b 虚线区）和实况回波（图 9b 阴影）也有很好的对应。因此，基于地面辐合场可以较好地对比风暴进行较为精细的追踪外推。再者，在图 9a 中可以看到外推后的回波场（阴影）和间隔 30 min 后的未来 30 min 累计雨量（虚线区）总体还是比较对应的，特别是其中的雨量最大中心区域和外推后回波中心区域较吻合。因

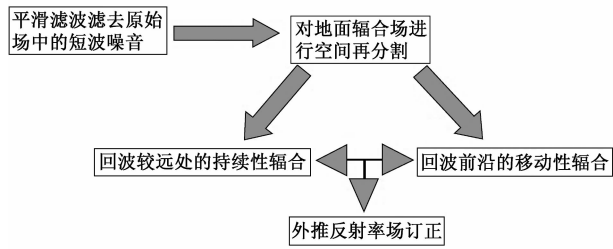


图 8 用地面辐合场进行外推订正的流程图  
Fig. 8 Flow chart of correcting the extrapolate result by use of the ground convergence field

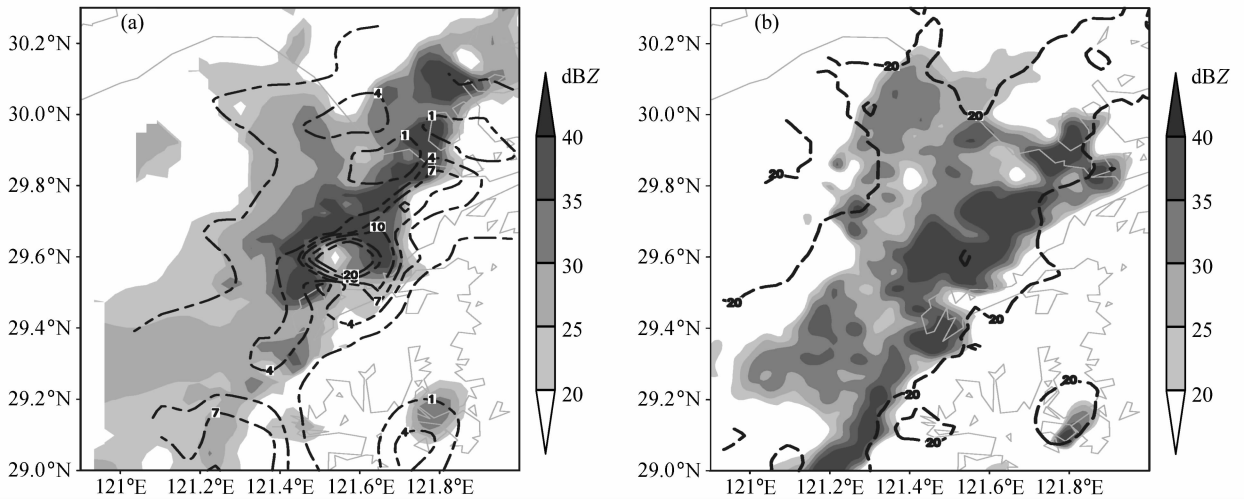


图 9 (a) 风暴外推 30 min 后的反射率场 (阴影) 以及未来 30 min 的累计雨量 (虚线, 单位: mm); (b) 实况雷达反射率场 (阴影) 以及风暴外推后回波大于 20 dBZ 的区域 (虚线)

Fig. 9 (a) The reflectivity field after storm extrapolating 30 min (shaded) and the future cumulative 30-min rainfall (dashed line, units: mm); (b) the live radar reflectivity field (shaded) and areas with echo greater than 20 dBZ after storm extrapolating (dashed line)

此,通过对雷达回波进行外推在一定程度上可以大致预报间隔 30 min 后的未来 30 min 累计雨量和,加上初始时刻的回波地面辐合情况可以大致预报未来 30 min 的雨。据此,我们可以得到较为定量的未来 1 小时的大致雨量范围和中心的预报信息。

在这里也存在着一些不足的地方,在图 9a (阴影)中可以看到在外推后,右上角出现的回波中心并没有在实况场中出现,这很可能是由于风暴在其区域并不是按照一定的线性移动或者所在的地面辐合场而发展的。再者外推出来的回波只能反演出较为平滑的回波结果,与实况在一定程度上还存在着一些细致的差别,需要在以后进行进一步研究和改进。

## 5 结论和讨论

本文通过多普勒雷达资料和经过质量控制后的加密自动站风场资料对近年来严重影响宁波地区的 6 月到 8 月之间的 10 次强对流灾害天气过程进行了一系列的研究。首先,分析加密地面辐合场对回波发展趋势的影响并逐时次统计雷达回波、地面中尺度辐合、累计雨量之间的相互关系,并进一步通过中尺度滤波来寻找风场辐合和回波发展之间的内在联系,最后,基于风场辐合和回波发展的对应关系,用交叉相关法试图对雷暴云进行外推预报。研究表明:

(1) 通过逐时次统计发现雷达回波前沿的辐合区域对浙江东部沿海地区未来回波的发生、发展有着重要作用。主要辐合则基本位于雷达回波的前沿较规律性地随着回波移动而移动,辐合中心(辐合线)和未来暴雨中心有着较好的对应,它们相互匹配的百分率为 73.7%。特别是存在辐合线的区域更有利于对流单体的新生和发展,其匹配率为 83.3%,辐合的效果可以更大程度地反应回波的发展趋势。同时辐合线对主回波未来的走向和形状也有较大的影响。

(2) 对个例通过 Shuman-Shapiro 滤波进行尺度分离后可以发现,回波发展前沿存在着较为明显的辐合线区域,该辐合线位置和未来回波位置、形状较为对应。并且,在有些回波团之间也存在着明显的风场作用,之后也生成了新的回波单体,这很可能是回波团之间的下沉气流接近和相遇时激发了新的积云塔。再通过雷达剖面研究发现在回波团之

间存在着明显的“回波桥”,这一“回波桥”很可能起了水汽、能量相互传输的媒介作用,低层风场上的辐合可能正是这一作用的重要触发机制,从而进一步证实低层气流辐合对单体新生有着重要的作用。

(3) 通过对雷达回波场基于地面辐合条件下进行风暴的外推,得到的结果与实况有较好的对应。并且,外推后的雷达回波场和未来 30 min 的累计雨量的区域比较匹配。再加上起始时刻的回波可以大致预报未来 30 min 的雨。那么,通过对回波进行外推我们不仅可以确定未来回波的强度和形状,同时,我们可以得到较为定量的未来 1 小时的大致雨量范围和中心的预报信息。

## 参考文献 (References)

- Barnes S L. 1972. Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations [R]. NOAA Technical Memorandum ERL, NSSL-62.
- 蔡则怡, 于波. 1988. 带通滤波在华北飑线预报中的应用 [J]. 气象, 14 (1): 23-27. Cai Zeyi, Yu Bo. 1988. Application of the band-pass filter for forecasting squall line in North China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 14 (1): 23-27.
- Cressman G P. 1959. An operational objective analysis system [J]. Mon. Wea. Rev., 87: 367-374.
- 陈忠明. 1992. 气象场中尺度带通滤波方法研究 [J]. 气象学报, 50 (4): 504-509. Chen Zhongming. 1992. Study of mesoscale band-pass filtering method for meteorological fields [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 50 (4): 504-509.
- 陈明轩, 王迎春, 俞小鼎. 2007. 交叉相关外推算法的改进及其在对流临近预报中的应用 [J]. 应用气象学报, 18 (5): 690-701. Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Yu Xiaoding. 2007. Improvement and application test of TREC algorithm for convective storm nowcast [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 18 (5): 690-701.
- 丁伟钰, 万齐林, 闫敬华, 等. 2006. 对流天气系统自动站雨量资料同化对降雨预报的影响 [J]. 大气科学, 30 (2): 317-326. Ding Weiyu, Wan Qilin, Yan Jinghua, et al. 2006. Variational assimilation of automatic weather stations rainfall in convective systems and its impact on rain forecast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 317-327.
- Dixon M, Wiener G. 1993. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting — A radar-based methodology [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 10 (6): 785-797.
- 房彬, 班显秀, 郭学良, 等. 2010. 雷达—雨量计—粒子激光探测仪联合估算降水量 [J]. 大气科学, 34 (3): 513-519. Fang Bin, Ban Xianxiu, Guo Xueliang, et al. 2010. Area rainfall estimation by using radar, raingauge, and particle laser-based optical measurement instrument [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences

- (in Chinese), 34 (3): 513-519.
- 高守亭, 周玉淑. 2001. 水平切变线上涡层不稳定理论 [J]. 气象学报, 59 (4): 393-404. Gao Shouting, Zhou Yushu. 2001. The instability of the vortex sheet along the horizontal shear line [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (4): 393-404.
- Henry S G. 1993. Analysis of thunderstorm lifetime as a function of size and intensity [C]. Preprints 26th International Conference on Radar Meteorology. Amer. Meteor. Soc., 138-140.
- Johnson J, Mackeen P A, Witt E M, et al. 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm [J]. Weather and Forecasting, 13: 263-276.
- 陆汉城, 杨国祥. 2004. 中尺度天气原理和预报 [M]. 北京: 气象出版社, 233-237. Lu Hancheng, Yang Guoxiang. 2004. Principles and Mesoscale Weather Forecasting (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 233-237.
- 刘黎平, 曹俊武, 莫月琴, 等. 2006. 雷达遥感新技术及其在灾害性天气探测中的应用 [J]. 热带气象学报, 22 (1): 1-9. Liu Liping, Cao Junwu, Mo Yueqin, et al. 2006. Advanced radar technology and application on observation of disaster weathers [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (1): 1-9.
- 刘黎平, 牟容, 许小永, 等. 2007. 一次飑线过程的动力和微物理结构及滴谱变化对降水估测的影响研究 [J]. 气象学报, 65 (4): 601-611. Liu Liping, Mu Rong, Xu Xiaoyong, et al. 2007. Dynamic and microphysical structures of a squall line system and effects of rain drop size distribution on precipitation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (4): 601-611.
- 卢焕珍, 赵玉洁, 俞小鼎, 等. 2008. 雷达观测的渤海湾陆风辐合线与自动站资料的对比分析 [J]. 气象, 34 (9): 57-65. Lu Huanzhen, Zhao Yujie, Yu Xiaoding, et al. 2008. Comparative analysis of sea-land breeze convergence line along Bohai Gulf with radar CINRAD-SA and automatic meteorological station data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (9): 57-65.
- Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. 2003. NCAR auto-nowcast system [J]. Weather and Forecasting, 18: 545-561.
- Qiu C, Xu Q. 1992. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler radar data [J]. J. Atmos. Oceanic Tech., 9 (5): 588-598.
- 邵明轩, 陈敏, 陶祖钰, 等. 2006. 降水量的直接同化对初始场的影响 [J]. 大气科学, 30 (2): 268-276. Shao Mingxuan, Chen Min, Tao Zuyu, et al. 2006. Effect of direct assimilation of precipitation on initial field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 268-276.
- Simpson J, Westcott N E, Clerman R J, et al. 1980. On cumulus mergers [J]. Arch. Met. Geoph. Biokl. (Ser. A), 29 (1): 1-40.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 25-34. Tao Shiyang. 1980. China Rainstorm (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 25-34.
- 陶祖钰. 1992. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法 [J]. 气象学报, 50 (1): 81-90. Tao Zuyu. 1992. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single Doppler velocity field [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 50 (1): 81-90.
- 覃丹宇. 2010. 用滤波方法进行 M<sub>a</sub>CS 云团形态差异的个例分析 [J]. 大气科学, 34 (1): 154-162. Qin Danyu. 2010. A case study of meso- $\alpha$ -scale convective system shape differences using filtering analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 154-162.
- Tuttle J, Gall R. 1999. A single radar technique for estimating the winds in tropical cyclones [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (4): 653-667.
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 2006. 多普勒天气雷达学原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1-95. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. 2006. Doppler Weather Radar: Principles and Applications (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-95.
- 翟国庆, 俞樟孝, 孙柏民. 1991. 应用雷达回波与地面中尺度扰动场作强对流天气分析 [J]. 科技通报, 7 (4): 191-201. Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao, Sun Bomini. 1991. Analysis of severe convective weather with radar echoes and surface mesoscale perturbation [J]. Bulletin of Science and Technology (in Chinese), 7 (4): 191-201.
- 翟国庆, 俞樟孝. 1991. 华东飑线过程中的地面中尺度物理特征 [J]. 大气科学, 15 (6): 63-69. Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao. 1991. The mesoscale surface characteristics in the squall line events over East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 15 (6): 63-69.
- 翟国庆, 俞樟孝. 1992. 强对流天气发生前期地面风场特征 [J]. 大气科学, 16 (5): 522-529. Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao. The surface characteristics of wind field prior to the occurrence of severe convection weather [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 16 (5): 522-529.
- 章国材, 矫梅燕, 李延香, 等. 2007. 现代天气预报技术和方法 [M]. 气象出版社, 140-143. Zhang Guocai, Jiao Meiyang, Li Yanxiang, et al. 2007. Modern Weather Forecasting Technology and Methods (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 140-143.



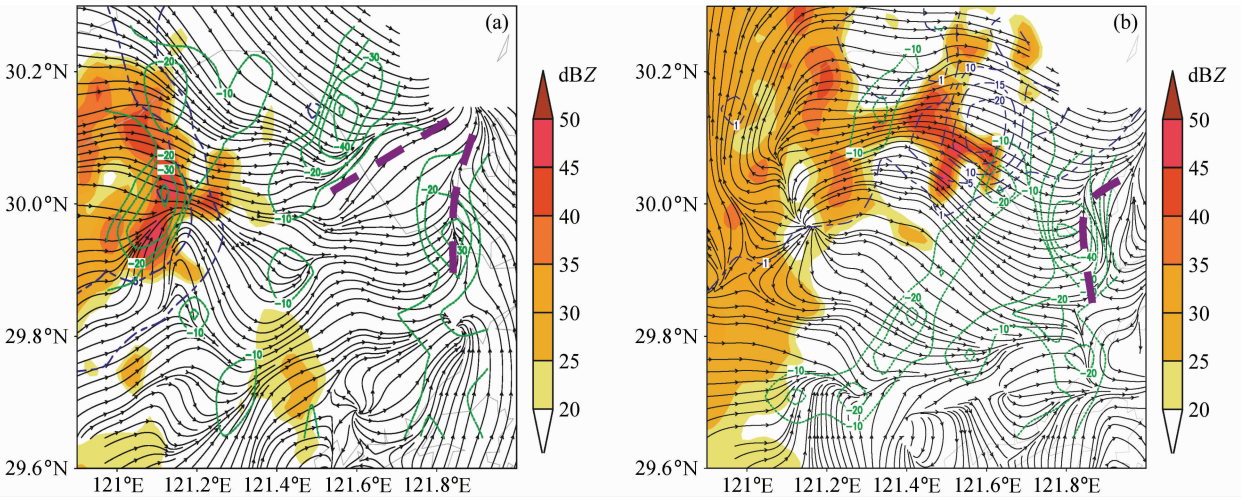


图 4 同图 3, 但为 2007 年 8 月 3 日 (a) 18:00 和 (b) 18:50  
 Fig. 4 As in Fig. 3, but for (a) 1800 BJT and (b) 1850 BJT 3 Aug 2007

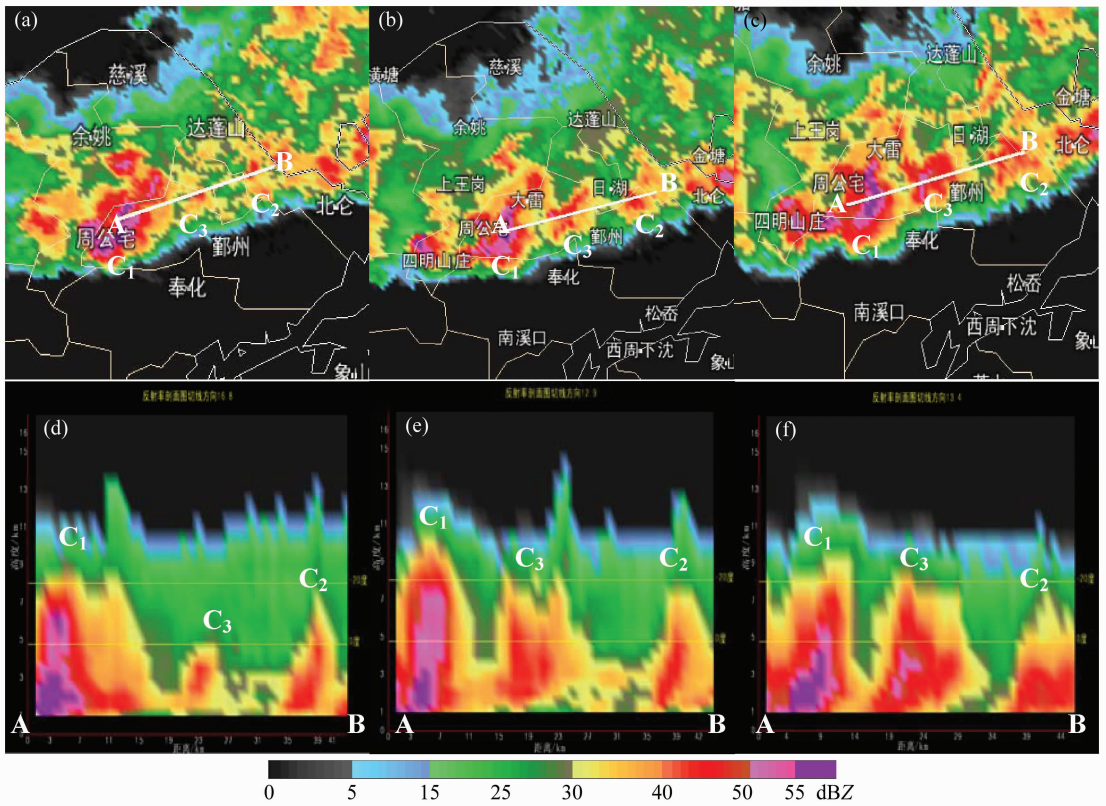


图 7 2009 年 6 月 5 日 (a, d) 19:24、(b, e) 19:30 和 (c, f) 19:36 雷达回波图; (a-c) 3 km 高度上 CAPPI 雷达反射率; (d-f) 沿 a-c 图中 AB 方向的剖面图

Fig. 7 Radar echoes diagram at (a, d) 1924 BJT, (b, e) 1930 BJT, and (c, f) 1936 BJT on 5 Jun 2009; (a-c) 3-km altitude CAPPI radar reflectivity; (d-f) cross section along AB in (a-c)